Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences des écosystèmes et des océans | Ecosystems and Oceans Science
Secrétariat canadien de consultation scientifique
Région du Centre et de l'Arctique | Avis scientifique 2016/001

ÉVALUATION DES COURBES DE PERFORMANCE NATATOIRE DES POISSONS

Figure 1. Exemple de canal volontaire. Ce chenal expérimental temporaire a été construit à l'installation de recherche de Noel Paul dans le centre de Terre-Neuve, au Canada (photo de M. Colavecchia). Les données sur la nage publiées, qui ont été obtenues de cette façon et au moyen d'autres types de configurations expérimentales, ont été incluses dans la base de données compilée et utilisée dans la présente étude afin d'élaborer les courbes de performance natatoire des poissons.

Contexte:

Le personnel de Gestion de l'habitat (GH) de Pêches et Océans Canada (MPO) doit passer en revue les critères de conception des passes à poissons et formuler un avis scientifique à leur sujet. Le personnel de GH de la région du Centre et de l'Arctique souhaitait traiter les lacunes en matière d'information liée à la performance natatoire des poissons dans le cadre des travaux d'évaluation et d'atténuation effectués dans la région. Pour l'aider dans cette tâche, on a élaboré des courbes de performance natatoire des poissons ont été élaborées. Elles estiment la vitesse des poissons en tant que fonction du temps de nage et de la distance de nage, en tant que fonction de la vitesse du courant, pour divers groupements d'espèces de poissons, et ce, en utilisant une base de données importante produite à partir de la littérature. Le Secteur des sciences du MPO a été chargé d'évaluer si les analyses et les résultats de l'étude étaient crédibles et si les conclusions tirées étaient valables sur le plan scientifique. On lui a également demandé de cerner les problèmes et les limites de l'analyse. Le présent avis scientifique découle de la réunion du 9 février 2011 à propos l'avis scientifique sur les courbes de performance natatoire des poissons. Toute autre publication découlant de cette réunion sera publiée, lorsqu'elle sera disponible, sur le calendrier des avis scientifiques de MPO.

Janvier 2016

Canada

SOMMAIRE

- Une base de données importante sur la performance natatoire des poissons représentant 132 espèces dulcicoles et diadromes a été produite à partir de la littérature, d'après divers tests relatifs à la performance natatoire des poissons qui ont produit un mélange de données sur la nage moyennes et individuelles.
- La combinaison des données sur la vitesse élevée (sprint ou vitesse de pointe) recueillies dans le cadre des essais de nage volontaire dans des canaux avec les données sur la vitesse modérée (prolongée) recueillies dans les tunnels (chambres de nage) a permis de définir les courbes de fatigue sur un intervalle de temps plus important et a aidé à éliminer certains biais.
- Les courbes de fatigue ont été obtenues au moyen de trois méthodes : le temps de nage (ou l'endurance) par rapport à la vitesse en tant que fonction de la longueur corporelle, le temps de nage par rapport à la vitesse en tant que fonction de la racine carrée de la longueur corporelle, et une analyse adimensionnelle utilisant une vitesse dimensionnelle formulée en incluant la constante d'accélération gravitationnelle dans la racine carrée de la longueur corporelle.
- Les courbes de fatigue générées en utilisant des variables adimensionnelles ont produit des estimations de la performance pour toute une gamme de tailles de poisson, de temps de nage et de vitesses de nage par rapport aux méthodes traditionnelles.
- Même s'il existe une grande variabilité de la performance natatoire entre les espèces et les individus, les analyses des données ont indiqué d'importantes similitudes de la performance relative pour certains groupes d'espèces. Des régressions vitesse-temps importantes ont été élaborées pour les individus dont la performance natatoire était faible ou forte.
- Pour certaines espèces, les données étaient d'assez bonne qualité pour permettre l'élaboration de courbes de fatigue individuelles. Lorsque les données disponibles sont insuffisantes, des courbes de fatigue adimensionnelles concernant des groupes d'espèces ayant des caractéristiques de nage similaires peuvent fournir des estimations raisonnables pour ces espèces dans les cas où la qualité des données disponibles est bonne.
- Des régressions vitesse-temps ont été utilisées pour fournir des estimations de la relation entre la distance de nage et la vitesse du courant pour différents niveaux de confiance. Les estimations de la distance de nage à partir des courbes de fatigue se comparent bien avec les mesures directes disponibles.
- Les résultats de ces analyses peuvent représenter la meilleure information disponible à l'heure actuelle pour traiter les questions relatives au passage du poisson étant donné les limites de la base de données et des analyses. Ils ne doivent pas être utilisés pour évaluer les situations où des poissons doivent être exclus (p. ex., espèces envahissantes).

INTRODUCTION

Les poissons dulcicoles et diadromes font habituellement des déplacements localisés et/ou migrent entre différents types d'habitats selon les différents stades de leur cycle vital. Dans les endroits où il y a des obstructions, les poissons peuvent avoir besoin d'un passage sous forme de passe à poissons ou de contournements pour pouvoir se déplacer en amont ou en aval. Les estimations du temps ou de la distance de fatigue liée à la nage seraient utiles pour étudier les aspects physiologiques dans des applications pratiques telles que les claies à poissons et les passes à poissons.

Le personnel de Gestion de l'habitat (GH) du Centre et de l'Arctique (C. et A.) du MPO doit passer en revue les critères de conception des passes à poissons et formuler un avis scientifique à leur sujet. Pour l'aider dans cette tâche on a élaboré des courbes de performance natatoire des poissons qui

estiment la vitesse des poissons par rapport au temps de nage ainsi que des courbes de la distance de nage par rapport à la vitesse du courante, qui sont utiles pour les passes à poissons et les claies à poisson. De telles courbes de performance natatoire des poissons ont été élaborées pour divers groupements d'espèces de poissons en utilisant une base de données importante produite à partir de la littérature. Ce document fournit des conseils sur l'exhaustivité de la base de données ainsi que sur la validité scientifique et les limites des analyses, des résultats et des conclusions associés aux courbes de performance natatoire des poissons. Les détails complets des méthodes, analyses et résultats de l'étude sont disponibles dans le document de Katopodis et Gervais (2016).

ÉVALUATION

Base de données

La plupart des données comprises dans l'importante base de données sur la performance natatoire des poissons ont été obtenues dans des études nord et sud-américaines, asiatiques, européennes et australiennes publiées en anglais dans des revues examinées par les pairs et dans des documents de littérature grise. L'accent a été mis sur les publications qui contenaient des mesures du temps de nage ou de la distance de nage pour les espèces dulcicoles et les espèces dont le cycle de vie comprenait une partie en eau douce (p. ex., espèces diadromes[1]). La plupart des données extraites de la littérature étaient présentées sous forme de données pour lesquelles les résultats relatifs à la performance sont déclarés en tant que valeurs moyennes avec écarts ou erreurs standard. Les résultats publiés dans la littérature sont habituellement un résumé des mesures qui ont été obtenues à partir d'une expérience ou d'un essai particulier dans le cadre duquel un certain nombre de poissons individuels ont fait l'objet d'essais. La performance globale du groupe est résumée et déclarée à l'aide de valeurs statistiques. La performance natatoire peut être assez variable entre les individus et il faut procéder à une mise à l'essai sur plusieurs poissons pour obtenir des estimations réalistes de la performance pour un groupe de poissons. Le groupement de données pour une expérience ou un essai particulier se base habituellement sur des individus qui sont très similaires (même espèce, taille similaire et habituellement de la même population) et qui font l'objet d'un élevage et d'une mise à l'essai identiques. Certaines données sur la performance concernant des individus ont été recueillies dans la littérature ou obtenues au moyen de demandes de données, toutefois, une grande partie des données brutes n'était pas disponible. Le manque de données brutes est l'une des limites de cette analyse.

Plusieurs critères ont été utilisés pour sélectionner les données de la base de données afin de garantir la rigueur scientifique. Les données sur la performance natatoire des poissons trouvées dans la littérature reflètent toute une gamme d'objectifs expérimentaux. La performance natatoire a été utilisée pour évaluer les effets des contaminants, la température de l'eau, le régime, la formation, le marquage et divers autres facteurs. Les données utilisées dans l'analyse ont été choisies de façon à exclure les résultats qui étaient basés sur des expériences dans le cadre desquelles des facteurs externes avaient une incidence importante sur la performance, par exemple, des contaminants, des températures extrêmes ou d'autres traitements qui ne font pas partie de l'expérience habituelle des poissons. Seules les données relatives au groupe de contrôle ou non traité ont été utilisées dans l'analyse. Toutefois, les données relatives au groupe traité ont été utilisées si elles étaient déclarées identiques sur le plan statistique à celles du groupe non traité. On a ensuite comparé les données individuelles à d'autres dans la base de données afin de mesurer leur qualité.

On a examiné les valeurs aberrantes afin de déterminer si elles devaient être retirées ou conservées. Des indicateurs ont été ajoutés à la base de données pour signaler les facteurs qui pourraient avoir une incidence sur la qualité des données, par exemple des données incomplètes ou le fait que les poissons

[1] Les poissons diadromes migrent entre l'eau salée (c.-à-d. la mer) et l'eau douce.

testeurs aient fait l'objet d'une anesthésie, d'une intervention chirurgicale ou d'un marquage. La base de données peut être consultée et divisée en utilisant le champ de l'indicateur. Des indicateurs ont été utilisés pour coder et sélectionner certaines données qui avaient été saisies dans la base de données et qui se sont révélées incomplètes, inexactes ou non pertinentes dans le cadre de l'analyse. Par exemple, les espèces marines qui ont été initialement saisies dans la base de données ont été signalées par un indicateur et exclues de toute analyse ultérieure à cette étape. La décision de se concentrer sur les espèces dulcicoles et diadromes se basait sur les besoins du personnel du MPO étant donné que ce sont celles qui sont concernées par la plupart des projets pour lesquels le passage des poissons pose problème. Elle visait à limiter le temps et les efforts supplémentaires qui seraient requis pour inclure les espèces marines. Les données sur la nage tirées de la littérature publiée ont été recueillies au moyen de divers tests de performance natatoire des poissons, qui avaient tendance à couvrir différentes parties des courbes de fatigue. La plupart des données sur la nage de la littérature sont fondées sur des tests de nage forcée qui sont réalisés en laboratoire dans un tunnel d'endurance ou une chambre de nage rotative. Les tests de nage forcée sont réalisés en utilisant un protocole de vitesse fixe (test d'endurance) ou de vitesse croissante. Ce dernier est habituellement utilisé pour déterminer ce qui est désigné comme la vitesse critique. Ces tests de nage produisent des données principalement dans la fourchette prolongée. Dans le cadre des tests de nage forcée, les poissons peuvent ne pas être en mesure d'exprimer leur performance natatoire optimale en raison de limites comportementales (voir ci-dessous).

Les tests de nage forcée ont été utilisés de façon plus longue et plus approfondie que les tests volontaires (qui sont plus récents) et, en général, ils mesurent la performance dans une fourchette de vitesses de nage modérées à basses (vitesses qui peuvent être maintenues pendant de nombreuses minutes ou plusieurs heures). On dispose donc de moins de données à partir des tests de nage volontaire et elles représentent une plus petite proportion des données incluses dans la base de données. Dans le cadre de ces tests, on mesure la distance ou le temps de nage pour les poissons nageant en aval par rapport à la vitesse du courant contrôlée dans un chenal ou un ponceau avec tentative de passage à la discrétion des poissons. Les tests volontaires utilisant un chenal ou un ponceau ont tendance à impliquer des distances relativement courtes (c.-à-d. inférieures à 100 mètres) et des temps de nage de quelques minutes ou moins. Par rapport aux chambres ou tunnels de nage, les canaux de chenal offrent une vitesse et une turbulence plus variables ainsi que des conditions hydrauliques qui peuvent améliorer le passage et produisent des résultats biaisés de façon positive. De récents travaux indiquent que les poissons peuvent optimiser leur performance natatoire dans le cadre des tests volontaires en chenal. Selon certains chercheurs, le comportement des poissons associé à la transition de l'allure peut être restreint dans les chambres de nage, ce qui peut produire des résultats biaisés de façon négative. Dans le cadre des tests volontaires, dans certaines limites, la longueur du canal ne semble pas avoir d'incidence sur la vitesse de transition de l'allure ou limiter la performance, telle que la fatigue, mais reflète les contraintes du comportement de nage.

Un seuil de 20 secondes a été utilisé dans la plupart des études pour faire la différence entre la vitesse de nage de pointe et la vitesse de nage prolongée chez le saumon rouge juvénile (*Oncorhynchus nerka*). Ce seuil n'a pas été utilisé dans la présente étude car il ne peut pas être appliqué à toutes les espèces. Les courbes de fatigue d'extrapolation obtenues à partir des données relatives au tunnel de nage uniquement sous-estimeraient la performance de pointe étant donné que ces données sont caractérisées par des pentes plus plates. Les courbes de fatigue d'extrapolation obtenues à partir des données relatives au chenal volontaire uniquement sous-estimeraient la performance prolongée étant donné que ces données sont caractérisées par des pentes raides. Pour ces raisons, les deux types de données ont été utilisés pour définir l'ensemble de la courbe de fatigue pour une espèce. La combinaison des données sur la nage forcée et volontaire aide à définir l'ensemble de la courbe de fatigue mais les limites des tests de nage forcée et volontaire devraient être reconnues étant donné qu'elles pourraient influencer les résultats.

La base de données prétraitées, qui représente 131 espèces de poissons[2], contenait des temps de nage inférieurs à 150 minutes. Étant donné qu'un poisson peut nager à une vitesse soutenue basse pendant une période indéfinie, au moins de façon théorique, une limite de temps de nage de 30 minutes a été appliquée aux analyses de données présentées. Cette limite de 30 minutes se basait sur la considération pratique selon laquelle il est peu probable qu'un poisson ait besoin de plus de 30 minutes pour nager devant une claie à poissons typique ou à travers une section de passe à poissons ou de ponceau. Toutefois, un poisson peut avoir besoin de plus longtemps (par exemple plusieurs jours) pour traverser une grande passe à poissons. Les données recueillies dans la littérature pour 131 espèces de poissons comprenaient les vitesses de nage de pointe, prolongée et soutenue qui correspondent à des temps de nage allant de quelques secondes à plusieurs heures. L'analyse a été limitée aux données sur la nage pour 30 minutes ou moins. Cette limite de 30 minutes pour l'endurance se basait sur des considérations de conception des installations de passage et de protection des poissons, pour lesquelles la conception de telles structures visant à traiter les vitesses de nage qui dépassent 30 minutes (nage continue) est à la fois difficile et coûteuse à produire. Même si cela est peu probable, pour les applications nécessitant une endurance plus importante, surtout pour les petits poissons qui nagent habituellement plus lentement, l'applicabilité des données pourrait être limitée.

Même si la base de données a des limites, elle fournit des renseignements sur la fourchette et l'ampleur de la performance natatoire des poissons pour un grand nombre d'espèces.

ANALYSE ET RÉSULTATS

Les données tirées de la littérature contiennent un mélange de données sur la nage moyennes et individuelles. En vue d'améliorer l'uniformité des données utilisées dans l'analyse, certains ensembles de données qui comprenaient des données de mesure des poissons individuels ont été reformatés en groupant les données de la même manière que pour d'autres ensemble de données regroupées recueillis dans la littérature. Le regroupement a été effectué au niveau de l'ensemble de données (c.-à-d. à partir d'une publication ou d'un document précis) lorsque les mesures individuelles d'un groupe de poissons ayant fait l'objet des mêmes tests et les différences liées à la longueur des poissons, à la température de l'eau, à la vitesse ou au temps de nage étaient de 10 % ou moins.

Des valeurs moyennes ont été utilisées pour ces données regroupées. Des valeurs médianes ont été utilisées pour certains tests de vitesse fixe dans le cadre desquels le temps de fatigue a été mesuré et certains poissons du groupe test ont nagé au-delà de la limite de temps du test. Les données tirées des études du passage des ponceaux n'ont pas été utilisées directement pour créer les courbes de fatigue parce que la vitesse et la turbulence sont variables dans le ponceau et parce que le poisson peut profiter de conditions hydrauliques plus favorables. Les mesures tirées des études sur le passage des ponceaux ont été utilisées pour vérifier les équations de la distance obtenues à partir des prévisions.

Les courbes de fatigue traditionnelles où le temps d'endurance est représenté en tant que fonction de la vitesse de nage (habituellement calculé en longueurs corporelles par seconde) ont été indiquées dans la littérature. Toutefois, des courbes de fatigue complètes sont disponibles pour très peu d'espèces et sont le plus souvent limitées en ce qui concerne la fourchette de longueurs et de temps d'endurance des poissons. Afin d'améliorer l'exactitude des estimations de la performance obtenues à partir des courbes de fatigues traditionnelles, une série de nouvelles relations basées sur des paramètres adimensionnels a été mise à l'essai. Différents paramètres adimensionnels ont été élaborés et mis à l'essai en comparant les résultats prévus pour la fourchette de tailles de poisson, de temps de fatigue et de vitesses de nage. Le coefficient de corrélation n'était pas le seul facteur qui a été utilisé pour déterminer la meilleure relation.

---

[2] Le document de travail original indiquait 82 espèces. Dans le cadre des révisions effectuées à la suite de la réunion, le nombre d'espèces est passé à 131.

Les données disponibles dans la littérature publiée et permettant d'établir les courbes de fatigue individuelles étaient insuffisantes pour de nombreuses espèces. Les relations entre la vitesse de nage, normalisée en tant que fonction de la longueur corporelle, et le temps de nage ont été calculées pour toutes les espèces de poissons combinées et ont donné des valeurs R^2 relativement faibles. Ensuite, la vitesse de nage a été normalisée en tant que fonction de la racine carrée de la longueur corporelle, ce qui a donné des valeurs R^2 relativement élevées. De plus, on a rendu la vitesse de nage adimensionnelle en incluant la gravité dans la racine carrée de la longueur, ce qui a donné des valeurs R^2 également élevées puisque l'accélération gravitationnelle est constante. L'analyse adimensionnelle des courbes de fatigue a été entreprise car elle permettait d'utiliser la quantité maximale de données disponibles, et donc une analyse plus globale pour des groupes d'espèces de poissons présentant une performance similaire et une similitude hydrodynamique, ainsi qu'une meilleure mise à l'échelle pour différentes longueurs de poissons. De plus, l'analyse adimensionnelle a également permis d'utiliser des ensembles de données limités et d'extrapoler dans des cas pour lesquels on ne disposait pas de données de bonne qualité. Il a ainsi été possible de combiner toutes les données disponibles sur la performance natatoire afin de créer des courbes vitesse de nage/temps de fatigue plus générales.

On s'est inspiré de la simple analogie de la relation entre la circonférence d'un cercle et son diamètre a pour expliquer l'analyse adimensionnelle. La relation entre le coefficient de résistance et le nombre de Reynolds[3] constitue une analogie plus complexe et plus étroite étant donné sa pertinence pour l'hydrodynamique et le déplacement des poissons.

Il est utile de noter que les mesures de la performance natatoire telles que le temps de fatigue dépendent de la physiologie du poisson ainsi que des caractéristiques hydrodynamiques. On a utilisé une approche écohydraulique[4] en combinant l'hydrodynamique et les variables physiologiques pour formuler l'analyse adimensionnelle. Plusieurs paramètres adimensionnels, notamment le nombre de Reynolds, ont été mis à l'essai. Une vitesse du poisson qui comprend l'accélération gravitationnelle a été choisie étant donné qu'il s'agit d'une constante relativement universelle et qu'elle est importante pour ce qui est du mouvement ondulatoire. De plus, c'est celle qui a produit les meilleurs résultats pour les paramètres mis à l'essai. La vitesse d'une vague (c.-à-d. la célérité) est proportionnelle à la racine carrée de la gravité multipliée par la longueur de la vague. L'analyse établit une analogie entre un poisson qui nage et une vague qui se déplace dans un chenal. Même si cette analogie pourrait être plus apparente dans des chenaux volontaires et plus ambigüe dans le cas de chambres de nage fermées, la gravité est également incluse dans les facteurs de frottement adimensionnels pour la dynamique des fluides en conduite (p. ex. ,diagramme de Moody). On ne connaît pas précisément la valeur biologique de la gravité et il pourrait être utile de poursuivre l'étude de la relation du nombre de Froude[5] avec la performance natatoire. Un terme d'accélération lié à la résistance pourrait également être utilisé pour les études futures étant donné que le frottement est proportionnel à la longueur.

Le processus de regroupement des données a été compliqué par les limites des données étant donné que les groupes ont été précisés en sous-groupes de plus en plus petits. L'absence de données a eu à

---

[3] Dans la mécanique des fluides et l'hydrodynamique, le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel qui donne une mesure du rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité et quantifie par conséquent l'importance relative de ces deux types de forces pour des conditions d'écoulement données.

[4] L'écohydraulique est un domaine interdisciplinaire étudiant les interactions entre l'eau et l'écologie. Dans le cas de cette étude, une approche fondée sur l'hydrodynamique a été utilisée pour analyser les données biologiques et hydrauliques afin de traiter les lacunes dans l'information sur la performance natatoire.

[5] Le nombre de Froude est un nombre adimensionnel défini comme le rapport entre une vitesse caractéristique et une vitesse d'onde de gravité. Dans la mécanique des fluides, le nombre de Froude est pertinent lorsque le poids du fluide constitue une force importante. Il est utilisé pour déterminer la résistance d'un objet se déplaçant dans l'eau et permet la comparaison d'objets de différentes tailles.

tendance à causer un déséquilibre dans la courbe de fatigue générale. La présentation originale et le document de travail reposaient sur seulement deux grands groupes d'espèces classifiées en tant que groupe des truites et groupe des anguilles, afin de refléter la catégorie d'espèce dominante de chaque groupe. Il a été recommandé de renommer ces groupes « groupes à performance natatoire élevée et faible » pour éviter la confusion étant donné le mélange d'espèces rassemblées, en particulier dans le groupe des truites. À la suite des recommandations formulées pendant l'examen, certains travaux supplémentaires sur le regroupement de données avec des données supplémentaires obtenues dans la littérature ont entraîné la création de six groupes : groupe des barbues de rivière et des malachigans, groupe des clupéidés (hareng), groupe des anguilles, groupe des brochets, groupe des saumons et des dorés jaune, et groupe des esturgeons (Katopodis et Gervais 2016). La base de données a ensuite été divisée en groupes de plus en plus petits selon les caractéristiques qui suggéraient des modes de déplacement similaires.

L'objectif de la division de la base de données, d'un grand groupe en plus petits groupes, était d'améliorer la valeur R^2 et l'écart-type de l'estimation pour les régressions vitesse de nage/temps de fatigue jusqu'à atteindre le point auquel les limites de l'ensemble de données dépassent tout gain supplémentaire. La première division de la base de données a posé problème car les deux groupes contenaient une grande gamme d'espèces, dont certaines utilisaient différents modes de nage. Le regroupement sur la base de la cinématique (c.-à-d. le nombre de vagues par longueur corporelle) peut être plus approprié si des renseignements sur la cinématique sont disponibles.

On a examiné le temps pour qu'un poisson se fatigue par rapport à la rapidité à laquelle il nage. La relation entre la vitesse de nage, en tant que fonction de la longueur corporelle, et le temps de nage, au niveau de l'espèce, pour 122 espèces de poissons combinées, était relativement faible pour les données non pondérées et pondérées (par taille d'échantillon). La valeur R^2 pour les points pondérés était de 0,244. L'analyse des mêmes données en utilisant des variables adimensionnelles a produit une valeur R^2 beaucoup plus élevée (0,617) pour les points pondérés. De même, le groupe des truites, composé de 65 des 76 espèces, avait des valeurs R^2 de 0,354 lorsque la vitesse de nage était exprimée en longueur corporelle par seconde, mais de 0,730 lorsque la vitesse de nage était exprimée en tant que fonction de la racine carrée de la longueur corporelle ou en tant que vitesse adimensionnelle (comprenant la gravité dans la racine carrée de la longueur).

On connaît nettement mieux la mise à l'échelle depuis que l'approche traditionnelle a été élaborée pour exprimer la vitesse de nage en tant que fonction de la longueur corporelle. L'analyse adimensionnelle normalise la vitesse de nage par rapport à la racine carrée de la longueur corporelle, ce qui reflète mieux les effets de la mise à l'échelle sur le déplacement selon les connaissances actuelles de la physiologie du poisson. L'analyse adimensionnelle a permis d'harmoniser les données pour les poissons juvéniles et adultes étant donné que la mise à l'échelle tenait compte des différences de la longueur corporelle. L'amélioration de la valeur R^2 obtenue grâce à l'analyse adimensionnelle a probablement résulté de l'application d'une approche plus significative sur le plan biologique que la méthode traditionnelle des longueurs corporelles par seconde. L'utilisation d'une analyse adimensionnelle a eu pour effet net d'établir des tendances générales et de produire des corrélations relativement bonnes et des réductions de la variabilité. Même si l'analyse adimensionnelle peut servir d'outil d'analyse des données sur la performance natatoire des poissons, elle a des limites. Il existe probablement de meilleurs moyens d'obtenir les relations afin d'intégrer davantage la variabilité dans le modèle. Par exemple, on pourrait appliquer l'approche théorique basée sur l'information pour créer des modèles de régression qui fourniraient potentiellement de meilleurs paramètres pour l'estimation de l'effet de la mise à l'échelle et pourraient produire des résultats encore plus précis.

Des régressions vitesse-temps importantes ont été élaborées pour les groupes d'individus dont la performance natatoire était faible ou forte. D'importantes similitudes de la performance relative des deux groupes d'espèces ont été repérées malgré la variabilité de la performance natatoire entre les espèces et les individus de la même espèce. La longueur corporelle et l'analyse adimensionnelle ont

montré que le groupe le plus faible avait des vitesses de nage inférieures au groupe le plus fort, ce qui laisse entendre qu'il est utile d'élaborer des courbes de fatigue distinctes pour les deux groupes. La sous-division de l'ensemble de données en plus petits groupes a permis d'améliorer la valeur R^2 même si des différences évidentes de la pente de régression ont été repérées dans certains regroupements (p. ex., les esturgeons par rapport aux anguilles). Les résultats de la nouvelle analyse effectuée à la suite de la réunion à l'aide de différents regroupements d'espèces sont présentés dans le document de Katopodis et Gervais (2016).

Une approche plus rigoureuse en matière d'analyse des données a été recommandée, en commençant au niveau de l'espèce. Il faut comparer les valeurs R^2 pour les régressions vitesse-temps qui sont calculées pour les diverses espèces pour déterminer si elles sont très différentes. Des espèces similaires peuvent être regroupées au besoin pour des analyses ultérieures (voir Katopodis et Gervais 2016).

Une comparaison des données relatives à la performance natatoire pour les nageurs subcarangiformes/labriformes et les nageurs carangiformes a révélé que davantage de données ont été publiées pour les nageurs subcarangiformes. Toutefois, les données sur certains nageurs labriformes sont principalement limitées à la fourchette de nage prolongée, ce qui fait que la fourchette de nage de pointe est sous-représentée et la performance natatoire peut être sous-estimée. Moins de données sur la nage sont disponibles pour les nageurs carngiformes et elles sont principalement limitées à la fourchette de nage de pointe, mais elles ont une variabilité inférieure aux données sur les nageurs subcarangiformes. Dans ces cas, le fait de se fier aux données sur la performance natatoire d'un seul groupe limiterait l'utilité des résultats. En combinant les groupes, on équilibre les faiblesses des différents ensembles de données. La base de données mise à jour (Katopodis et Gervais 2016) regroupe tous les nageurs subcarangiformes et les nomme groupe des saumons et des dorés jaunes. Elle contient des données suffisantes sur la vitesse de pointe et la vitesse prolongée pour créer des courbes de fatigue équilibrées avec une valeur R^2 de 0,70 lorsque la vitesse de nage est exprimée en tant que fonction de la racine carrée de la longueur corporelle (et 0,31 lorsque la vitesse de nage est exprimée en tant que longueurs corporelles par seconde).

Dans cette étude, on a calculé les régressions de la courbe de fatigue pour divers regroupements d'espèces en utilisant une analyse à échelle bilogarithmique car cela permettait aux points de données de se propager, les rendant plus faciles à voir. Cette approche peut expliquer la raison pour laquelle les données sur la vitesse de pointe et la vitesse prolongée pourraient être adaptées sur une droite. Les régressions de la courbe de fatigue sont habituellement analysées en utilisant une échelle linéaire logarithmique (c.-à-d. que le logarithme temps est une fonction linéaire de la vitesse de nage exprimée en tant que longueurs corporelles par seconde), ce qui est plus cohérent avec la théorie de la défaillance en ce qui concerne la répartition escomptée. Étant donné que l'approche bilogarithmique peut avoir une incidence sur les résultats obtenus, une discussion et des explications plus détaillées ainsi qu'une justification de cette approche sont comprises dans le document de Katopodis et Gervais (2016).

La température peut avoir une incidence sur la performance natatoire. Cette étude excluait les données recueillies à des températures très élevées et très basses ou dans le cadre d'études des effets de la température. La performance natatoire se révèle moins susceptible aux changements de température à des vitesses de sprint qu'à des vitesses plus lentes car le muscle blanc utilisé pendant les sprints de courte durée agit avec un effet Q_{10} très faible. Ainsi, il pourrait y avoir peu d'effets sur les poissons qui nagent à une vitesse de sprint. Toutefois, il pourrait y avoir des effets plus importants pendant la période de récupération si le poisson a été poussé jusqu'à ses limites. Il a été recommandé que le document de recherche porte sur l'incidence que la température aurait sur les courbes de fatigue obtenues étant donné les connaissances actuelles de la biochimie des poissons.

Les données sur la performance natatoire de certaines espèces (p. ex., le meunier noir *Catostomus commersonii* et la lamproie *Petromyzon marinus*) sont groupées de façon relativement serrée le long de la ligne de régression de la courbe de fatigue, ce qui laisse entendre que ces données sont de qualité suffisante pour répondre aux questions sur le passage des poissons pour ces espèces et peut-être pour d'autres espèces. Pour d'autres espèces (p. ex,, la truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss*), il y avait une variabilité importante de la performance natatoire individuelle. Il faudra regrouper les espèces pour lesquelles les données étaient insuffisantes pour créer des courbes de fatigue individuelles afin de pouvoir prévoir la courbe de fatigue générale. Il faut ajouter au document de recherche un document montrant la qualité des données (p. ex., aucune donnée, qualité faible, qualité satisfaisante ou qualité bonne) pour chaque espèce afin d'indiquer au lecteur si les données sont suffisantes pour tirer des conclusions. Il faut également noter lorsque des similitudes entre les espèces peuvent permettre des extrapolations d'une espèce à l'autre. Par exemple, les données de bonne qualité concernant la truite brune (*Salmo trutta*) peuvent-elles être extrapolées pour toutes les truites? Il a été recommandé de ne pas inclure les régressions dans les cas pour lesquels seulement un ou deux points de données sont disponibles étant donné qu'ils ne sont pas informatifs.

Les estimations du temps de fatigue et de la distance de nage ont des applications pratiques dans le cadre de l'étude des aspects physiologiques du passage des poissons. Pour cette raison, les régressions de la courbe de fatigue (vitesse-temps) ont été converties en courbes distance de nage-vitesse du courant. Les limites de prévisions étaient basées sur toutes les espèces. Les données sur la distance de nage obtenues étaient relativement comparables aux mesures directes des distances de nage, même si certains écarts étaient évidents. Par exemple, les données mesurées sur le terrain couvrent uniquement les percentiles 25 % à 75 % des données prédites, ce qui laisse entendre une erreur considérable dans les projections. Cependant, la distance théorique maximale doit dépasser la distance réellement parcourue par les poissons car ils n'arrivent en général pas à optimiser leur performance natatoire. Une des autres irrégularités remarquées relativement aux courbes distance de nage-vitesse du courant obtenues était le fait que le percentile 25 % à des vitesses supérieures correspond au percentile 75 % à des distances de nage supérieures, ce qui laisse entendre que le modèle a des limites importantes.

Dans l'ensemble, les résultats relatifs à la distance de nage présentés dans l'étude sont de qualité suffisante pour être utilisés à des fins de gestion une fois les recommandations suivantes appliquées. Il faut comparer les données sur la nage réelles et estimées pour les regroupements plus petits afin de mieux comprendre la variance des données calculées. Il faut mieux expliquer la méthode utilisée pour obtenir les courbes de distance Il a également été recommandé que le document de recherche explique clairement que les lignes de prédiction du diagramme de quartiles montrent la distance maximale, avec des intervalles de confiance, qui doit pouvoir être passée par les poissons, et non la proportion de la population qui est passée. Ce point a des répercussions importantes sur la façon dont les données peuvent être utilisées à des fins de gestion.

Plusieurs recommandations supplémentaires ont été formulées afin d'apporter des améliorations générales au document de recherche. Il faut traduire la base de données sur la performance natatoire diverse et variable afin que les données soient plus accessibles. Les objectifs, la justification et les suppositions des analyses de données doivent être mieux expliqués. Les limites des analyses doivent être explicitement quantifiées et qualifiées.

Les résultats de cette étude représentent la meilleure information disponible à l'heure actuelle sur la fourchette et l'ampleur de la performance natatoire pour de nombreuses espèces de poissons, même si la base de données et les analyses ont des limites. Les données concernant les différentes espèces de poissons doivent être utilisées lorsqu'elles sont disponibles. En reconnaissant que des données ne sont pas toujours disponibles pour une espèce et qu'il existe d'importantes similitudes entre les espèces, il peut être possible d'utiliser les données obtenues à partir d'un ensemble regroupé

d'espèces de poissons, au besoin. Autrement, des données doivent être recueillies pour combler les lacunes dans les connaissances.

Cette étude a été conçue pour répondre aux questions sur le passage des poissons, non sur l'exclusion des espèces exotiques ou envahissantes. La base de données comprenait des études conçues pour que les poissons nagent rapidement, mais nous ne pouvons pas être certains qu'ils ne sont pas capables de nager plus rapidement. C'est pour cette raison qu'il est recommandé d'utiliser les résultats de cette étude pour les claies à poissons et l'exclusion des poissons à faible risque, mais pas pour répondre aux questions sur l'exclusion des poissons à risque élevé appartenant à des espèces exotiques ou envahissantes. Le passage imprévu d'espèces exotiques ou envahissantes pourrait avoir des conséquences négatives importantes. Cela étant dit, l'utilisation de la vitesse en tant qu'obstacle ou filtre aux fins d'exclusion de poissons peut être possible, et les renseignements correspondants doivent donc être inclus dans le document de recherche.

Sources d'incertitude

Certaines des méthodes expérimentales utilisées dans la littérature sur la performance natatoire ont produit des erreurs intrinsèques ainsi qu'une variabilité accrue de la base de données et de l'incertitude relativement aux résultats de l'étude. Il faudrait analyser à nouveau les données ou en générer de nouvelles en complément des données disponibles pour supprimer ces types d'erreurs intrinsèques dans la base de données.

Les sources d'incertitude comprennent l'interprétation des données obtenues à partir des tests relatifs à la vitesse de nage critique en ce qui concerne l'endurance et l'emplacement de ces données sur la courbe de fatigue. Les limites des données existantes tirées des tests en chenaux volontaires et l'absence de données supplémentaires sont également des sources d'incertitude en ce qui concerne les estimations de la performance. Les données limitées sur la distance de nage réelle constituent une autre source d'incertitude potentielle pour mieux vérifier les estimations de la distance de nage en utilisant la vitesse de nage et le temps d'endurance.

La performance natatoire dépend de facteurs qui ne peuvent pas être mesurés de façon concluante. Les structures de passage des poissons réelles génèrent souvent des écoulements non uniformes (c.-à-d. des conditions hydrauliques qui diffèrent de celles mises à l'essai dans un dispositif de performance natatoire). Les données utilisées pour calculer les estimations de la performance reposaient sur une mise à l'essai avec des conditions d'écoulement plutôt uniformes et l'application de ces résultats aux écoulements à fortes turbulences pourrait donner des estimations inexactes.

CONCLUSIONS

Une vaste base de données sur la performance natatoire des poissons a été produite à partir de la littérature concernant 131 espèces de poissons dulcicoles et diadromes. Les données ont été recueillies au moyen de divers tests de performance natatoire des poissons, qui avaient tendance à couvrir différentes parties des courbes de fatigue. Des critères ont été utilisés pour sélectionner les données et en évaluer la qualité. Après la mise à jour de la base de données effectuée à la suite de la réunion, 122 espèces (données traitées) ont été incluses dans le document de Katopodis et Gervais (2016). Étant donné que la base de données contient un mélange de données sur la nage moyennes, médianes et individuelles, les données individuelles ont été converties en valeurs moyennes ou médianes aux fins de cohérence.

La combinaison des données sur la vitesse de pointe et des données sur la vitesse prolongée a permis de définir les courbes de fatigue sur un intervalle de temps plus important et d'éliminer les biais associés à l'utilisation d'un seul type de données. Toutefois, il reste des questions sur le comportement des poissons associé à la transition de l'allure pour les essais avec vitesse forcée. De même, les effets

de la variation de la vitesse du courant et de la turbulence peuvent influencer l'exactitude des mesures de la performance des poissons dans les chenaux. Les chambres de nage et les chenaux présentent des conditions hydrauliques qui sont plus uniformes que celles des passes à poissons. Ces limites, en plus d'autres facteurs biologiques et hydrauliques, contribuent à la variance de la vitesse de nage et du temps de fatigue des poissons. Par conséquent, les estimations de la performance natatoire ne sont pas exactes, mais varient de façon intrinsèque en fonction des conditions hydrauliques par lesquelles passent les poissons.

Un temps de nage maximal de 30 minutes a été appliqué à la base de données pour des considérations pratiques. Pour les applications pour lesquelles une endurance plus importante est requise, surtout pour les petits poissons qui nagent habituellement plus lentement, l'applicabilité des données pourrait être limitée.

Les courbes de fatigue ont été obtenues au moyen de trois méthodes : le temps de nage par rapport à la vitesse en tant que fonction de la longueur corporelle, le temps de nage par rapport à la vitesse en tant que fonction de la racine carrée de la longueur corporelle, et une analyse adimensionnelle utilisant une vitesse dimensionnelle formulée en incluant la constante d'accélération gravitationnelle dans la racine carrée de la longueur corporelle. Pour de nombreuses espèces, les données disponibles sont insuffisantes pour créer des courbes de fatigue individuelles. Une approche écohydraulique utilisant la vitesse adimensionnelle a permis de réaliser des analyses de données plus globales pour des groupes d'espèces de poissons et d'utiliser des ensembles de données limités.

Même s'il existe une variabilité de la performance natatoire entre les espèces et les individus d'une même espèce, les analyses de données ont indiqué d'importantes similitudes de la performance relative pour certains groupes d'espèces. Des régressions vitesse-temps importantes ont été élaborées pour les individus dont la performance natatoire était faible ou forte. De plus petits regroupements pourraient permettre de légères améliorations des régressions.

Pour certaines espèces, les données étaient d'assez bonne qualité pour permettre l'élaboration de courbes de fatigue individuelles. Lorsque les données disponibles sont insuffisantes pour de plus petits groupes ou pour certaines espèces, des courbes de fatigue adimensionnelles concernant des groupes d'espèces ayant des caractéristiques de nage similaires peuvent fournir des estimations raisonnables dans les cas où les données disponibles sont de bonne qualité.

Des régressions vitesse-temps ont fourni des estimations de la relation entre la distance de nage et la vitesse du courant pour différents niveaux de confiance. Les estimations de la distance de nage à partir des courbes de fatigue se comparent de façon raisonnable avec les mesures directes disponibles.

Même si des limites et des incertitudes sont associées à la base de données et aux analyses, les résultats de cette étude fournissent des renseignements sur la fourchette et l'ampleur de la performance natatoire des poissons. Des courbes d'endurance ou de distance précises sont disponibles pour certaines espèces. Elles peuvent être appliquées de façon pratique. Les résultats de cette étude ne doivent pas servir de recommandation pour l'exclusion d'espèces de poissons exotiques ou envahissantes.

SOURCES DE RENSEIGNEMENTS

Le présent avis scientifique découle de la réunion du 9 février 2011 à propos l'avis scientifique sur les courbes de performance natatoire des poissons. Toute autre publication découlant de cette réunion sera publiée, lorsqu'elle sera disponible, sur le calendrier des avis scientifiques de Pêches et Océans Canada.

Katopodis, C., and Gervais, R. 2016. Fish swimming performance data base and analyses. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res Doc 2016/002. vi + 550 p.

CE RAPPORT EST DISPONIBLE AUPRÈS DU :

Centre des avis scientifiques (CAS)
Région du Centre et de l'Arctique
Pêches et Océans Canada
501 University Crescent
Winnipeg, MB
R3T 2N6

Téléphone : (204) 983-5131
Courriel : xcna-csa-cas@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1919-5117
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2016

La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2016. Évaluation des courbes de performance natatoire des poissons. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2016/001.

Also available in English :

DFO. 2016. Assessment of fish swimming performance curves. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2016/001.